

УДК 551.448:624.131

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТРЕХ СПОСОБОВ РАСЧЕТА ДИАМЕТРА КАРСТОВО-ОБВАЛЬНОГО ПРОВАЛА “ПРОСТОГО” ТИПА

© 2023 г. В. П. Хоменко^{1,*}, М. В. Леоненко^{2,**}, А. О. Дзущев^{3,***}

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337 Россия*

² *ООО “Дзержинская карстовая лаборатория”, пр. Циолковского, 4а, к. 19, Дзержинск, Нижегородская обл., 606025 Россия*

³ *ООО “Аврора СК”, ул. Лужники, 24, стр. 22, оф. 114, Москва, 119048 Россия*

**E-mail: oms@mgsu.ru*

***E-mail: mail@prokarst.ru*

****E-mail: avrorask@inboxru*

Поступила в редакцию 18.11.2022 г.

После доработки 18.11.2022 г.

Принята к публикации 29.11.2022 г.

Рассматривается возможность прогнозирования размеров карстовых провалов, возникающих на территориях, где растворимые породы перекрыты глинистыми породами. Процесс формирования этих провалов включает в себя только обрушение глинистых пород, и по этой причине такого рода поверхностные карстовые проявления целесообразно именовать карстово-обвальными провалами “простого” типа. Их появление на земной поверхности или под подошвами фундаментов чаще всего бывает вызвано растворением карстующихся пород, однако роль триггера могут сыграть и другие факторы природного или техногенного характера (например, снижение пьезометрического напора карстовых вод), что случается гораздо реже. На застроенных территориях эта разновидность карстового провалообразования может привести к деформированию и даже разрушению зданий и сооружений. Изучение данного феномена в полевых условиях и на лабораторных физических моделях показало, что карстово-обвальные провалы “простого” типа представляют собой результат последовательного обрушения глинистых пород, которое на первой стадии может принять вид их внутреннего вывала. Рассмотрены три способа прогнозирования диаметров таких провалов, отличающиеся друг от друга в теоретических предпосылках, но использующие одинаковые исходные параметры для прогностических расчетов. Осуществлена сравнительная верификационная оценка решений, полученных этими способами применительно к общему объекту.

Ключевые слова: *карст, глинистые породы, обрушение, провал, прогноз*

DOI: 10.31857/S086978092301006X, **EDN:** HSNGWB

ВВЕДЕНИЕ

В конце прошлого века, благодаря И.А. Саваренскому и Н.А. Миронову [8], в отечественную методическую (а затем и в нормативную) литературу прочно вошел термин “карстово-обвальные провалы”. Так стали называть провалы, возникающие при обрушении кровли полости, сформировавшейся в растворимых (карстующихся) породах. Впоследствии один из авторов упомянутой статьи выделил генетическую разновидность карстово-обвальных провалов, приуроченную к территориям, где растворимые породы перекрыты от их кровли до земной поверхности слабопроницаемыми глинистыми породами. Подобные провалы было предложено именовать карстово-обвальными провалами “простого” типа [11]. Название

было мотивировано тем, что механизм этой разновидности карстового провалообразования не осложнен гидродинамическими разрушениями несвязных водонасыщенных дисперсных пород, что характерно для карстово-обвального провалообразования “сложного” типа [12].

В англоязычных публикациях для наименования карстово-обвальных провалов “простого” типа чаще всего применяют термины “dropout sinkholes” [17] или “cover collapse sinkholes” [15]. Геологические условия, в которых проявляется эта генетическая разновидность карстового провалообразования, характерны для разных регионов планеты, а сам этот феномен представляет серьезную опасность для строительства и для окружающей среды. Наша страна не является ис-



Рис. 1. Скопление карстовых воронок, сформировавшееся в результате длительного и интенсивного карстово-обвального провалообразования “простого” типа (Павловский район Нижегородской области, 2007 г.). Фото В.П. Хоменко.

ключением. В частности, в некоторых карстовых районах Республики Башкортостан регулярное появление провалов такого типа наносит значительный ущерб хозяйственным объектам различного назначения [1]. Иногда многочисленные, близко расположенные (и даже примыкающие друг к другу) старые карстовые воронки, образовавшиеся в результате выполаживания бортов карстово-обвальных провалов “простого” типа, формируют специфические ландшафты с контрастным рельефом, что можно видеть на рис. 1. Естественно, строительное освоение таких территорий требует значительных затрат.

ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЕ, ВЫЗВАННОЕ ОБРУШЕНИЕМ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД В КАРСТОВУЮ ПОЛОСТЬ

Известны три основные причины обрушения глинистых пород в нижележащую карстовую полость: 1) расширение карстовой полости на контакте с подошвой глинистых пород за счет растворения ее стенок; 2) динамические воздействия на глинистые породы; 3) падение пьезометрического напора карстовых вод, т.е. снижение направленного вверх поддерживающего гидростатического давления на подошву глинистого водопора. Первый фактор, как правило, является результатом естественного протекания карстового процесса. Второй фактор может иметь как природное (землетрясения), так и техногенное (работа определенных механизмов, движение транспорта и др.) происхождение. Третий фактор преимущественно является результатом искусственного отбора карстовых вод для различных целей [16]. Рассмотрим два примера, иллюстрирующих действие первого и третьего факторов.

Первым примером служит участок, расположенный на территории Павловского района Нижегородской обл. вблизи деревень Коровино и

Кишемское. Здесь уже несколько тысячелетий продолжается массовое формирование карстовых провалов, вызванное естественным растворением нижнепермских сульфатных и верхнепермских карбонатных пород [3]. Выше карстующихся пород залегают верхнепермские глины с прослоями алевролитов и мергелей, перекрытые вплоть до земной поверхности четвертичными суглинками. Суммарная мощность глинистой толщи составляет первые десятки метров, а карстовые воды обладают пьезометрическим напором, достигающим 18 м. Диаметры свежих провальных форм доходят до 16 м, а диаметры старых воронок достигают десятков метров (см. рис. 1). В пределах участка и на окружающих его территориях каких-либо значительных техногенных воздействий на геологическую среду не наблюдается.

В качестве второго примера можно привести ситуацию, сложившуюся в середине прошлого века в штате Пенсильвания (США), в окрестностях населенного пункта Херши, где находится известная шоколадная фабрика [14]. Недалеко от нее уже многие годы осуществлялась сначала открытая, а затем подземная добыча ордовикских известняков. В мае 1949 г. почти двукратно усилился шахтный водоотлив, в результате чего образовалась депрессионная воронка площадью около 30 км², в центре которой уровень подземных вод был снижен на 75 м. В пределах этой воронки, где снижение уровня грунтовых вод превысило 15 м, на территории площадью около 7 км² за 5 мес образовалось более 100 провалов поперечником от 2 до 7 м и глубиной до 8 м. Известняки здесь содержат многочисленные полости и перекрыты до земной поверхности глинистым элювием средней мощностью 20 м, который начал обрушиваться в полости в результате падения поддерживающего эти породы вертикального гидростатического давления. До 1949 г. в этой



Рис. 2. Свежий карстово-обвальный провал “простого” типа, образовавшийся в результате обрушения глинистых пород в Кунгурскую ледяную пещеру (окраина г. Кунгура Пермского края, 2004 г.). Фото В.П. Хоменко.

местности практически горизонтальная пьезометрическая поверхность карстовых вод занимала стабильное положение на глубине около 8 м. Карстовые провалы появлялись, но крайне редко, поскольку это было связано с очень медленным растворением известняков при существовавшем до этого времени гидродинамическом режиме подземных вод. После того, как в декабре 1949 г. район добычи известняков был ограничен цементной завесой, и одновременно с этим началась искусственная подпитка подземных вод за ее пределами, провалообразование, зона которого уже подступала к зданиям фабрики, прекратилось.

В подавляющем большинстве случаев свежие карстовые провалы, которые образуются в результате сквозного обрушения глинистых пород, выходящего на земную поверхность, имеют конфигурацию, близкую к цилиндрической (рис. 2). Это означает, что данная форма рельефа представляет собой результат обрушения монолитного грунтового блока в виде вертикального круглого цилиндра, и при этом глинистые породы испытывают срез по его боковой поверхности. Теоретическое обоснование этого феномена было дано Г.П. Постоевым [5], причем не только в отношении глинистых пород.

Иногда свежие карстово-обвальные провалы “простого” типа имеют куполообразную форму. Обычно провалы такой конфигурации приурочены к участкам неглубокого залегания растворимых пород, поэтому они легко воспроизводятся на лабораторных физических моделях [10] и выглядят в вертикальном разрезе так, как показано на рис. 3. В натуральных условиях куполообразные карстово-обвальные провалы “простого” типа обнаруживаются довольно редко, потому что нависающие грунтовые “консоли” очень быстро

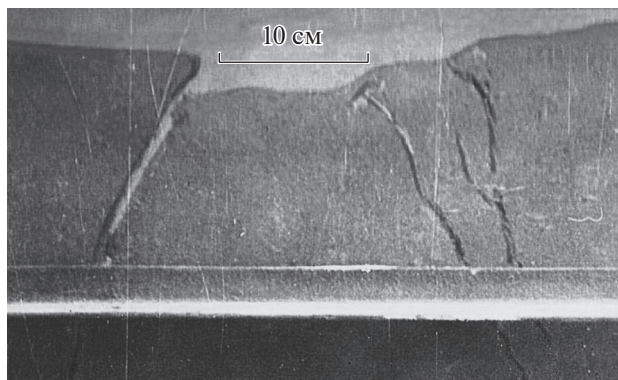


Рис. 3. Куполообразный провал, образовавшийся в теле “плоской” модели из эквивалентных материалов (масштаб 1: 16) в ходе экспериментального изучения обрушения глин в расширяющуюся полость. Материал, имитировавший глины, представлял собой смесь сухого пылеватого песка и порошкообразного бентонита с трансформаторным маслом.

обваливаются под действием собственного веса, что, в общем-то, можно видеть и в правой части рис. 3.

При достаточно большой глубине залегания кровли растворимых пород обрушение глинистых пород в карстовые полости может происходить и без выхода на земную поверхность, и тогда оно принимает вид так называемого внутреннего вывала. В этом случае выше полости, сформированной в растворимых породах, над которой произошло обрушение перекрывающих ее глинистых пород, возникает новая (вторичная) полость. Она ограничена сверху куполообразным сводом, по поверхности которого происходит разрыв и сдвиг глинистых пород при выпадении монолитного грунтового блока. На рис. 4 показана вторичная карстовая полость обрушения шириной около 1.5 м, вскрывшаяся в борту небольшого карьера приблизительно на глубине 5 м от земной поверхности, на которой это обрушение никак не проявилось.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ

В настоящее время известны два концептуальных подхода к прогностическому расчету диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа на детерминистической основе. Оба они базируются на принципе оценки предельного состояния глинистых пород в момент их обрушения в полость при равенстве сил, вызывающих этот процесс (вес горной породы), и сил, ему противостоящих (сопротивление горной породы сдвигу и разрыву, а также поддерживающее гидростатическое давление). В основе обоих подхо-



Рис. 4. Вторичная полость, образовавшаяся в результате обрушения пермских глин в первичную полость, находящуюся в нижележащих пермских гипсах (окрестности г. Павлово Нижегородской области, 2013 г.). Кадр видеосъемки, выполненной М.В. Леоненко.

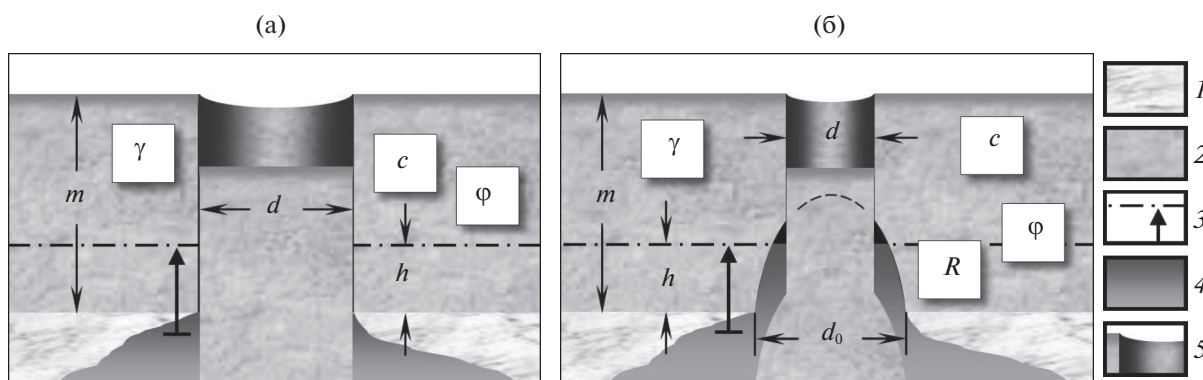


Рис. 5. Схемы, иллюстрирующие концептуальные подходы к прогностическому расчету диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа: а – подход, опирающийся исключительно на геомеханическую модель А. Бирбаумера; б – подход, опирающийся на геомеханические модели А. Бирбаумера и М.М. Протодяконова. Буквенные обозначения расшифрованы в тексте. 1 – растворимые породы; 2 – глинистые породы; 3 – пьезометрический уровень карстовых вод; 4 – полость, заполненная водой; 5 – провал.

дов лежат теоретические разработки, предложенные еще в начале прошлого века в области горного дела, разумеется, модернизированные и адаптированные к решению задач инженерного карстоведения.

Первый концептуальный подход исходит из предположения, что свежий карстово-обвальный провал “простого” типа формируется одновременно за счет нисходящего сдвига в карстовую полость монолитного блока глинистых пород в виде вертикального круглого цилиндра, имеющего высоту, равную глубине залегания кровли растворимых пород (рис. 5а). Простейшую геомеханическую модель, пригодную для формального описания этого процесса, предложил в 1913 г. немецкий исследователь А. Бирбаумер (A. Bierbauer) [13].

Второй концептуальный подход опирается на идею, что карстово-обвальное провалообразова-

ние “простого” типа может включать в себя в качестве первой стадии обрушение глинистых пород в виде их внутреннего вывала, ограниченного обращенным вершиной вверх параболоидом вращения. На следующей стадии в образовавшуюся таким образом вторичную полость происходит нисходящий сдвиг монолитного цилиндрического блока вышележащих глинистых пород, но его высота уже будет равна расстоянию по вертикали от земной поверхности до верхней точки вторичной полости (рис. 5б). В этом случае, кроме модели А. Бирбаумера, в расчет принимается еще и разработанная в 1912 г. геомеханическая модель М.М. Протодяконова [6], на которую можно опираться при математическом описании процесса формирования внутреннего вывала.

Существует довольно много методов прогностического расчета диаметров карстовых провалов рассматриваемого генетического типа, реали-

зующих оба рассмотренных выше подхода [2]. В качестве трех наиболее характерных и принципиально различающихся между собой альтернативных теоретических решений, разработанных отечественными специалистами, предлагается сравнить между собой расчетные методы, авторами которых являются Г.М. Троицкий, В.В. Савин и В.П. Хоменко. Поскольку во всех трех способах в качестве исходных параметров для прогностических расчетов используются одинаковые величины, результаты соответствующих прогнозов могут быть корректно сопоставлены.

ХАРАКТЕРИСТИКА ТРЕХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СПОСОБОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Способ Г.М. Троицкого является единственным решением, пригодным для прогностического расчета диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа, которое условно можно считать нормативным, поскольку оно рекомендовано к применению методическим документом [7]. В основе способа лежит геомеханическая модель А. Бирбаумера (см. рис. 5а). Согласно теоретическому решению Г.М. Троицкого, функциональная зависимость диаметра провала от глубины залегания кровли растворимых пород имеет линейный характер. Само это решение в упрощенном виде (для однородной глинистой толщи и без учета давления под подошвой фундамента) выражается формулой:

$$d = 2m\xi \tan \varphi + 4c/\gamma, \quad (1)$$

где d – диаметр провала; m – глубина залегания кровли растворимых пород, м; ξ – коэффициент бокового давления глинистых пород; φ – их угол внутреннего трения, градус; c – их удельное сцепление, кПа; γ – их удельный вес, кН/м³.

При этом величина ξ рассчитывается по формуле:

$$\xi = 1 - \sin \varphi. \quad (2)$$

Способ В.В. Савина [9], также как и способ Г.М. Троицкого, применим для прогностического расчета диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа и тоже базируется на геомеханической модели А. Бирбаумера (см. рис. 5а). Вместе с тем, в отличие от предыдущего, это теоретическое решение математически выражает нелинейную функциональную зависимость диаметра провала от глубины залегания кровли растворимых пород, которая имеет следующий вид:

$$d = 4m\xi \tan \varphi / \ln(1 + \gamma m \xi \tan \varphi / c). \quad (3)$$

Кроме того, величина ξ , присутствующая в формуле (3), рассчитывается по-другому:

$$\xi = \tan^2(45^\circ - \varphi/2). \quad (4)$$

Способ В.П. Хоменко [12], в отличие от двух предыдущих, не просто пригоден, а специально разработан для расчета диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа и представляет собой теоретическое решение, объединяющее геомеханические модели А. Бирбаумера и М.М. Протодьяконова (см. рис. 5б). Также как и способ В.В. Савина, способ В.П. Хоменко предлагает нелинейную интерпретацию функциональной зависимости диаметра провала от глубины залегания кровли растворимых пород, а величина ξ в обоих случаях рассчитывается по формуле (4). Согласно решению В.П. Хоменко, соответствующие прогностические расчеты осуществляются по следующим формулам:

$$d = 2\xi(m - d_0/2f) \tan \varphi + 4c/\gamma, \quad (5)$$

$$d_0 = 4f(\gamma_w h + R)/\gamma + 16c/3\gamma, \quad (6)$$

$$f = \tan \varphi + c/\gamma m, \quad (7)$$

где d_0 – критическая ширина карстовой полости на контакте с перекрывающими ее глинистыми породами, обеспечивающая их внутренний вывал, м; f – коэффициент крепости глинистых пород по М.М. Протодьяконову; γ_w – удельный вес воды, принимаемый равным 10 кН/м³; h – пьезометрический напор карстовых вод, м; R – сопротивление глинистых пород разрыву, кПа.

Согласно теоретическому решению В.П. Хоменко, карстово-обвальное провалообразование “простого” типа становится невозможным, если $d > d_0$: в этом случае обрушение глинистых пород ограничивается их внутренним вывалом. При выполнении неравенства $d_0 > 2fm$ вывала не будет, и обрушение сразу выйдет на поверхность, а внутреннее пространство провала будет иметь куполообразную форму (см. рис. 3).

Существуют серьезные расхождения в результатах прогностических расчетов, осуществляемых с использованием трех перечисленных выше способов. Эти расхождения проявляются тем сильнее, чем выше прочность глинистых пород, испытывающих обрушение, и чем больше глубина залегания растворимых пород (рис. 6). В связи с этим возникает необходимость сравнить результаты соответствующих расчетов с реальными диаметрами карстово-обвальных провалов “простого” типа при наличии возможности их корректного сравнения.

Такая возможность представилась после того, как в 2018 г. вблизи села Неледино Шатковского района Нижегородской области образовался карстово-обвальный провал “простого” типа, и были проведены необходимые исследования и измерения [4]. Первоначальный диаметр провала (d_f) был равен 16 м (рис. 7), и он имел форму, близкую к вертикально-круглоцилиндрической. На участке провала кровля растворимых пород (верхне-

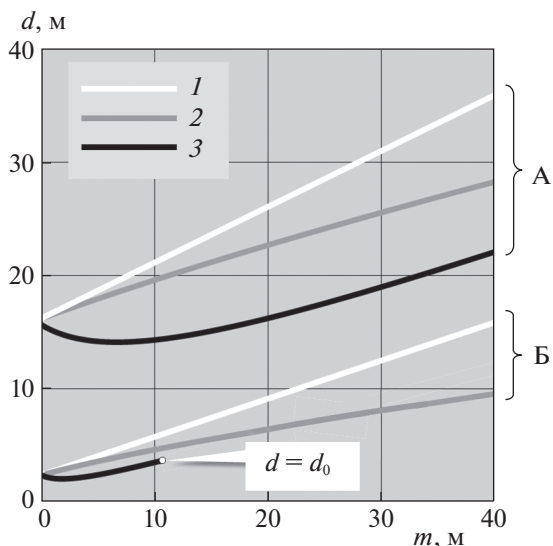


Рис. 6. Графически выраженные зависимости прогнозируемого диаметра карстово-обвального провала “простого” типа (d) от глубины залегания кровли растворимых пород (m), рассчитанного способами Г.М. Троицкого (1), В.В. Савина (2) и В.П. Хоменко (3): А – для прочных глин ($\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $\varphi = 21^\circ$; $c = 81 \text{ кПа}$; $R = 16 \text{ кПа}$); Б – для слабых суглинков ($\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $\varphi = 12^\circ$; $c = 12 \text{ кПа}$; $R = 2 \text{ кПа}$).

пермских известняков) находится на глубине (m), равной 30 м. Они перекрыты верхнепермскими и четвертичными глинистыми породами, причем мощность четвертичных пород (по визуальной оценке) составляет приблизительно 1/5 от общей мощности толщи глинистых пород. Карстовые воды на участке провала безнапорные ($h = 0$).

Что касается физико-механических свойств глинистых пород, то в качестве исходных данных были приняты величины, полученные обратными расчетами для глинистых пород той же стратиграфической единицы (татарского яруса верхней

перми) на участке карстово-обвального провала “простого” типа, образовавшегося в 1959 г. у деревни Пивоварово Вязниковского района Владимирской области [11]: $\gamma = 21 \text{ кН/м}^3$; $\varphi = 23^\circ$; $c = 77 \text{ кПа}$; $R = 32 \text{ кПа}$. Результаты промежуточных и окончательных прогностических расчетов, а также сравнительной верификационной оценки трех рассматриваемых методов представлены в табл. 1.

ВЫВОДЫ

1. Основным содержанием процесса формирования карстово-обвального провала “простого” типа является обрушение глинистых пород в карстовую полость. Провалы этой генетической разновидности появляются там, где растворимые породы перекрыты глинистыми породами вплоть до земной поверхности. Карстово-обвальное провалообразование “простого” типа может быть инициировано техногенными факторами (например, искусственным отбором карстовых вод) и представляет серьезную опасность для зданий и сооружений.

2. Существуют два подхода к прогнозированию диаметра карстово-обвального провала “простого” типа на расчетно-теоретической основе. Один подход допускает, что в расчет достаточно принимать только нисходящий сдвиг в карстовую полость круглого вертикального грунтового цилиндра, высота которого равна мощности глинистых пород, перекрывающих растворимые породы. Другой подход исходит из предпосылки, что этому процессу должен предшествовать внутренний вывал глинистых пород, ограниченный обращенным вершиной вверх параболоидом вращения. Оба эти подхода базируются на теоретических разработках в области горного дела, предложенных еще в начале



Рис. 7. Карстово-обвальный провал “простого” типа, выбранный в качестве объекта для сравнительной верификационной оценки трех способов прогностического расчета диаметров провалов (Шатковский район Нижегородской области, 2019 г.). Фото В.П. Хоменко. Штриховой линией показан приблизительный контур провала в момент его образования в 2018 г.

Таблица 1. Результаты сравнительной верификационной оценки трех способов прогностического расчета диаметра карстово-обвального провала “простого” типа (d) для участка существующего провала (см. рис. 7) с фактическим диаметром (d_f), равным 16.0 м

Автор способа	Результаты промежуточных и окончательных прогностических расчетов и оценок	Оценка точности прогноза	
		Абсолютная ошибка прогноза ($d - d_f$)	Относительная ошибка прогноза ($(d - d_f)/d_f$)
Г.М. Троицкий	Расчет по формуле (2): $\xi = 0.609$ Расчет по формуле (1): $d = 30.2$ м	14.2 м	0.89
В.В. Савин	Расчет по формуле (4): $\xi = 0.438$ Расчет по формуле (3): $d = 24.1$ м	8.1 м	0.51
В.П. Хоменко	Расчет по формуле (7): $f = 0.547$ Расчет по формуле (6): $d_0 = 22.9$ м Провал должен иметь цилиндрическую форму ($d_0 < 2fm = 32.8$ м) Расчет по формуле (4): $\xi = 0.438$ Расчет по формуле (5): $d = 18.0$ м Обрушение должно завершиться образованием провала ($d < d_0$)	2.0 м	0.13

XX века. По существу, первый подход рассматривает карстово-обвальное провалообразование “простого” типа как одностадийный процесс, а второй – как двухстадийный.

3. Результаты, получаемые с помощью трех (из многих применяемых в настоящее время) способов расчета диаметра карстово-обвального провала “простого” типа, были корректно сопоставлены, благодаря использованию ими одинаковых исходных параметров. Сравнение полученных с помощью этих трех способов прогностических решений применительно к одному и тому же объекту показало наибольшую адекватность способа, рассматривающего данный тип карстового провалообразования как двухстадийный процесс, разумеется, с учетом конкретных геологических условий. Кроме того, в отличие от других двух, этот способ позволяет оценивать конфигурацию ожидаемого провала в вертикальном разрезе и принципиальную возможность его образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рождественский А.П. и др. Карст Башкортостана. Уфа: Информреклама, 2002. 384 с.
2. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
3. Копосов Е.В., Тычина О.В. Изучение фаз развития и учет возраста провальных воронок при инженерно-геологическом районировании закарстованных территорий // Инженерная геология. 1983. № 5. С. 67–74.
4. Леоненко М.В., Юргин О.В., Хоменко В.П., Лаврусевич А.А. Риск образования карста (на примере провала близ деревни Неледино Шатковского района Нижегородской области) // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата – ГЕОРИСК-2018: Матер. X Междунар. научно-практ. конф.: в 2 т. / Отв. Ред. Н.Г. Мавлянова. М.: РУДН, 2018. Т. 1. С. 77–82.
5. Постоев Г.П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.; СПб.: Нестор-История, 2013. 100 с.
6. Протодьяконов М.М. Попытка опытного исследования законов давления пород на горные выработки // Горный журнал. 1912. № 4–5. С. 12–39.
7. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях / НИИОСП им. Герсеева. М.: ПЭМ ВНИИИС, 1985. 78 с.
8. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИИС Минстроя России, 1995. 167 с.
9. Савин В.В., Хусаинов И.Ж. Определение критического радиуса карстовой полости // Автомобильные дороги. 1984. № 12. С. 20–21.
10. Толмачев В.В., Карпов Е.Г., Хоменко В.П., Мартин В.И., Давыдько Р.Б. Механизм деформаций горных пород над подземными карстовыми формами // Инженерная геология. 1982. № 4. С. 46–59.
11. Хоменко В.П. Карстово-обвальные провалы “простого” типа: полевые исследования // Инженерная геология. 2009. № 4. С. 40–48.
12. Хоменко В.П. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: матер. Междунар. симп. / Под ред. В.Н. Катаева и др. Пермь: ПГНИУ, 2015. С. 50–60.
13. Bierbaumer A. Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerkes. Leipzig: W. Engelmann, 1913. 102 p.

14. *Foose R.M.* Ground-Water Behavior in the Hershey Valley, Pennsylvania // *Bulletin of the Geological Society of America*. 1953. Vol. 64. No 6. P. 623–645.
15. *Gutiérrez F., Cooper A.H., Johnson K.S.* Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas // *Environmental Geology*. 2008. Vol. 53. No 5. P. 1008–1022.
16. *Khomenko V.P., Leonenko M.V.* The collapse of clays covering a karst cavity: in-situ investigation, conceptual model and prediction // *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: Proc. of the XVI ECSMGE, Edinburgh, UK, 13–17 September 2015*. Vol. 4: Slopes and Geohazards. ICE Publishing, 2015. P. 2269–2274.
17. *Waltham A.C., Fookes P.G.* Engineering classification of karst ground conditions // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2003. Vol. 36. P. 101–118.

COMPARISON OF THREE APPROACHES TO CALCULATING DIAMETER OF A DROPOUT SINKHOLE

V. P. Khomenko^{a,#}, M. V. Leonenko^{b,##}, and A. O. Dzutsev^{c,###}

^a *National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia*

^b *Dzerzhinsk Karst Laboratory, pr. Tsiolkovskogo, 4a, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod oblast, 606025 Russia*

^c *Avrora SK Co., ul. Luzhniki, 24, str. 22, Moscow, 119048 Russia*

[#] *E-mail: oms@mgsu.ru*

^{##} *E-mail: mail@prokarst.ru*

^{###} *E-mail: avrorask@inbox.ru*

The possibility of sinkhole size prediction in the areas, where soluble rocks are covered by impermeable clay layer is considered. Such sinkholes are named by English-speaking authors as “dropout sinkholes” or “cover collapse sinkholes”, because the process of their formation includes collapse (dropping) of clay covering soluble rocks into a karst cavity. Triggers of this effect are: (1) widening of a cavity below the clay due to dissolution of a soluble rock by groundwater; (2) lowering of hydraulic head in confined karst aquifer, primarily caused by groundwater pumping, which results in decreased support of the overlying clay layer; (3) a dynamic load on the clays, which can have either natural or man-made origin. Fresh dropout sinkholes generally have configuration similar to vertical right circular cylinder, but sometimes their shape can be dome-like with very unstable ground “cantilevers”. The appearance of these forms under foundations can lead to deformation and even to destruction of buildings, structures, and infrastructure facilities. Two concepts exist, which can be used as basis for creating models of soil mechanics to calculate diameter of a dropout sinkhole. The first one is based on a viewpoint that clay collapse into a cavity after a trigger action is displayed immediately at the ground surface as a collapse sink. According to the second concept, the preliminary subsurface collapse of clay occurs as fall of ground block resembling a circular paraboloid. As a result, a dome-like cavity appears in the clay layer and above-lying clay fall into it to form a collapse sink. There are no prediction methods based on the two above-mentioned conceptions. The developed approaches to prediction of a dropout sinkhole diameter are adequately comparable, as they use the same input calculation parameters. The prediction results based on these approaches have been compared to an actual diameter of fresh dropout sinkhole. This verification have allowed us to infer that most adequate is the approach based on concept of initial subsurface clay’s collapse preceding the final collapse sink formation.

Keywords: *karst, clays, collapse, sinkhole, prediction*

REFERENCES

1. *Abdrakhmanov, R.F., Martin, V.I., Popov, V.G., Rozhdestvenskii, A.P., et al.* *Karst Bashkortostana* [Karst of Bashkortostan]. Ufa, Informreklama Publ., 2002, 384 p. (in Russian)
2. *Anikeev, A.V.* *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh raionakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Collapse and subsidence sinks in karst regions: formation mechanisms, prediction, and risk assessment]. Moscow, RUDN Univ. Publ., 2017, 328 p. (in Russian)
3. *Koposov, E.V., Tychina, O.V.* *Izuchenie faz razvitiya i uchet vozrasta proval'nykh voronok pri inzhenerno-geologicheskoy rayonirovaniy zakarstovannykh territoriy* [A study of the stages of development and age of slump holes for engineering geological zonation of karst areas]. *Inzhenernaya geologiya*, 1983, no. 5, pp. 67–74. (in Russian)
4. *Leonenko, M.V., Yurgin, O.V., Khomenko, V.P., Lavrusevich, A.A.* *Risk obrazovaniya karsta (na primere provala bliz derevni Neledino Shatkovskogo raiona Nizhegorodskoi oblasti)* [Risk of karst formation (by the example of a sinkhole near Neledino village in Shatkovskoye raion)] // *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: Proc. of the XVI ECSMGE, Edinburgh, UK, 13–17 September 2015*. Vol. 4: Slopes and Geohazards. ICE Publishing, 2015. P. 2269–2274.

- kovsky District, Nizhny Novgorod region)]. *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami s uchetom global'nogo izmeneniya klimata – GEORISK-2018: Materialy X Mezhd. nauchno-prak. konferentsii* [Analysis, prediction, and natural risk management considering global climate change – GEORISK-2018. Proc. 10th Int. Sci.-Practical Conf.]. Moscow, RUDN Publ., 2018. vol. 1, pp. 77–82. (in Russian)
5. Postoev, G.P. *Predel'noe sostoyanie i deformatsii gruntov v massive (opolzni, karstovye provaly, osadki gruntovykh osnovanii)* [Critical state and strain of soil in a ground-mass (landslide, sinkhole, ground settlement)]. Moscow; St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2013, 100 p. (in Russian)
 6. Protodyakonov, M.M. *Popytka opytnogo issledovaniya zakonov davleniya porod na gornye vyrabotki* [Attempt of experimental research of laws of soil's pressure on mine openings]. *Gornyi zhurnal*, 1912, no. 4–5, pp. 12–39. (in Russian)
 7. *Rekomendatsii po proektirovaniyu fundamentov na za-karstovannykh territoriyakh* [Guidance on foundation design in karst areas]. Moscow, PEM VNIIS Publ., 1985, 78 p. (in Russian)
 8. Savarenskii, I.A., Mironov, N.A. *Rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam v raionakh raz-vitiya karsta* [Manual for geological site investigations in karst-prone areas]. Moscow, PNIIS Publ., 1995, 167 p. (in Russian)
 9. Savin, V.V., Khusainov, I.Zh. *Opreделение критического радиуса карстовой полости* [Determination of a critical radius of karst cavity]. *Avtomobil'nye dorogi*, 1984, no. 12, pp. 20–21. (in Russian)
 10. Tolmachev, V.V., Karpov, E.G., Khomenko, V.P., Martin, V.I., Davyd'ko, R.B. *Mekhanizm deformatsii gornykh porod nad podzemnymi karstovymi formami* [A mechanism of rock deformation above the under-ground karst forms]. *Inzhenernaya geologiya*, 1982, no. 4, pp. 46–59. (in Russian)
 11. Khomenko, V.P. *Karstovo-obval'nye provaly "prostogo" tipa: polevye issledovaniya* [Collapse sinkholes of "simple" type: in situ investigations]. *Inzhenernaya geologiya*, 2009, no. 4, pp. 40–48. (in Russian)
 12. Khomenko, V.P. *Karstovoe provaloobrazovanie: mekhanizm i otsenka opasnosti* [Collapse sinkholes formation: mechanisms and hazard assessment]. *Ekologicheskaya bezopasnost' i stroitel'stvo v karstovykh raionakh. Materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Environmental safety and construction in karst areas. Proc. of the International Symposium]. Kataev, V.N., Zolotarev, D.R., Shcherbakov, S.V., Shilova, A.V., Eds. Perm, Perm State University Publ., 2015, pp. 50–60. (in Russian)
 13. Bierbaumer, A. *Die Dimensionierung des Tunnell-mauerwerkes*. Leipzig, W. Engelmann, 1913. 102 p. (in German)
 14. Foose, R.M. Groundwater behavior in the Hershey Valley, Pennsylvania. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1953, vol. 64, no. 6, pp. 623–645.
 15. Gutiérrez, F., Cooper, A.H., Johnson, K.S. Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas. *Environmental Geology*, 2008, vol. 53, no. 5, pp. 1008–1022.
 16. Khomenko, V.P., Leonenko, M.V. The collapse of clays covering a karst cavity: in-situ investigation, conceptual model and prediction. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. Proc. of the XVI ECSMGE, Edinburgh, UK, 13–17 September 2015, vol. 4. Slopes and Geohazards. ICE Publishing, 2015, pp. 2269–2274.
 17. Waltham, A.C., Fookes, P.G. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2003, vol. 36, pp. 101–118.